

NANOZNANOST

Kvantni celularni automati, računalni nano-domino

Robert Slunjski¹, Elena Mavrek

¹ Zavod za fiziku materijala, Laboratorij za poluvodiče



Mooreov zakon:



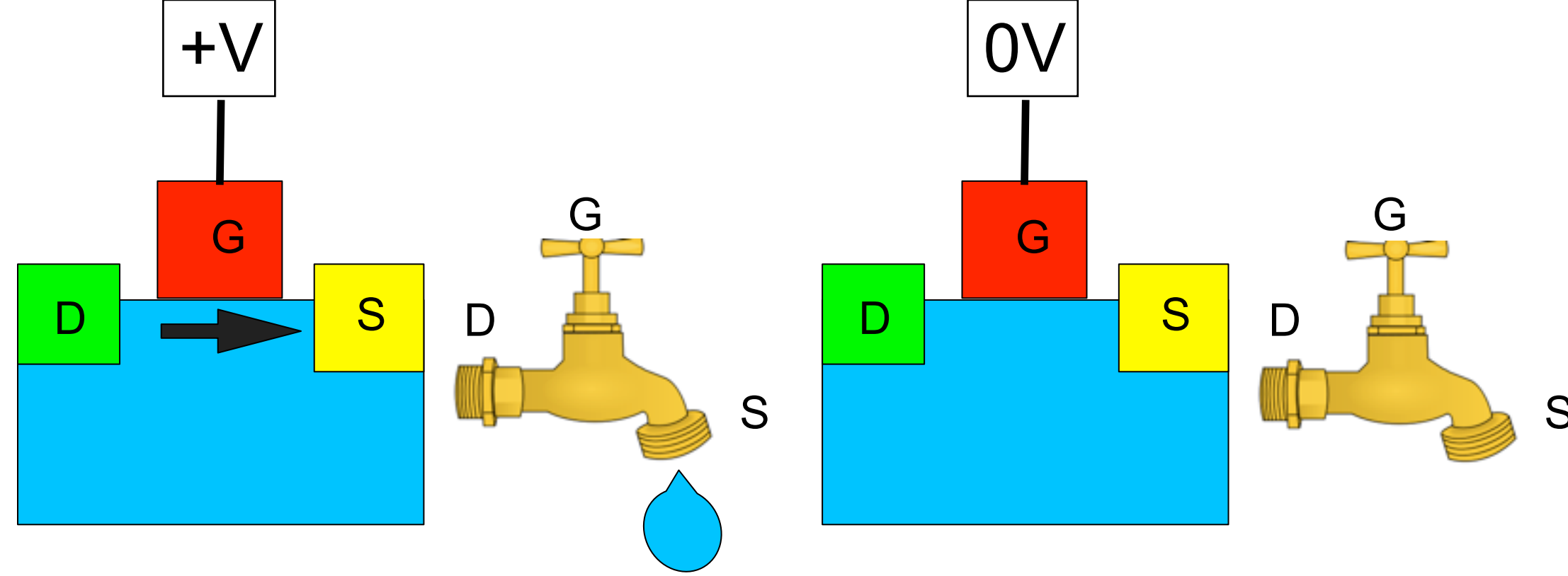
Gordon Moore

Gordon Moore jedan je od osnivača kompanije Intel. 1965 g. Moore je uočio [1] da se svake dvije godine broj aktivnih elemenata na nekoj površini čipa udvostručuje uz istu cijenu proizvodnje čipa (Slika 1a. i 1b.).

Spomenuto tehnološko-ekonomsko opažanje zove se **Mooreov zakon**.

Originalno, Moore je predvidio da će njegovo opažanje vrijediti najviše 10 do 15 godina, no inovativnost i novi dizajn elektroničkih komponenti produžio je trajanje Mooreovog zakona sve do danas. Produženje Mooreovog zakona predstavlja ustvari povijest, odnosno revoluciju tehnoloških otkrića u mikroelektronici i nanoelektronici do danas.

Snaga Mooreovog zakona vidi se u Slici 2. gdje je pokazana usporedba površine dvaju čipova, prvi proizveden 1971 g. koji ima samo 2300 aktivna elementa, a drugi iz 2000 g. koji ima oko 42 000 000 aktivna elementa. (Danas tipični čip za PC računala ima preko 2 milijarde aktivnih elemenata u jednoj jezgri).



Slika 3. Transistor kao električna sklopka. Ako je na G-elektrodi napon +V onda iz elektrode D teče struja u elektrodu S (otvorena pipa kao bit 1) Ako na G-elektrodi nema napona iz D ne teče struja u S. (zatvorena pipa kao bit 0)

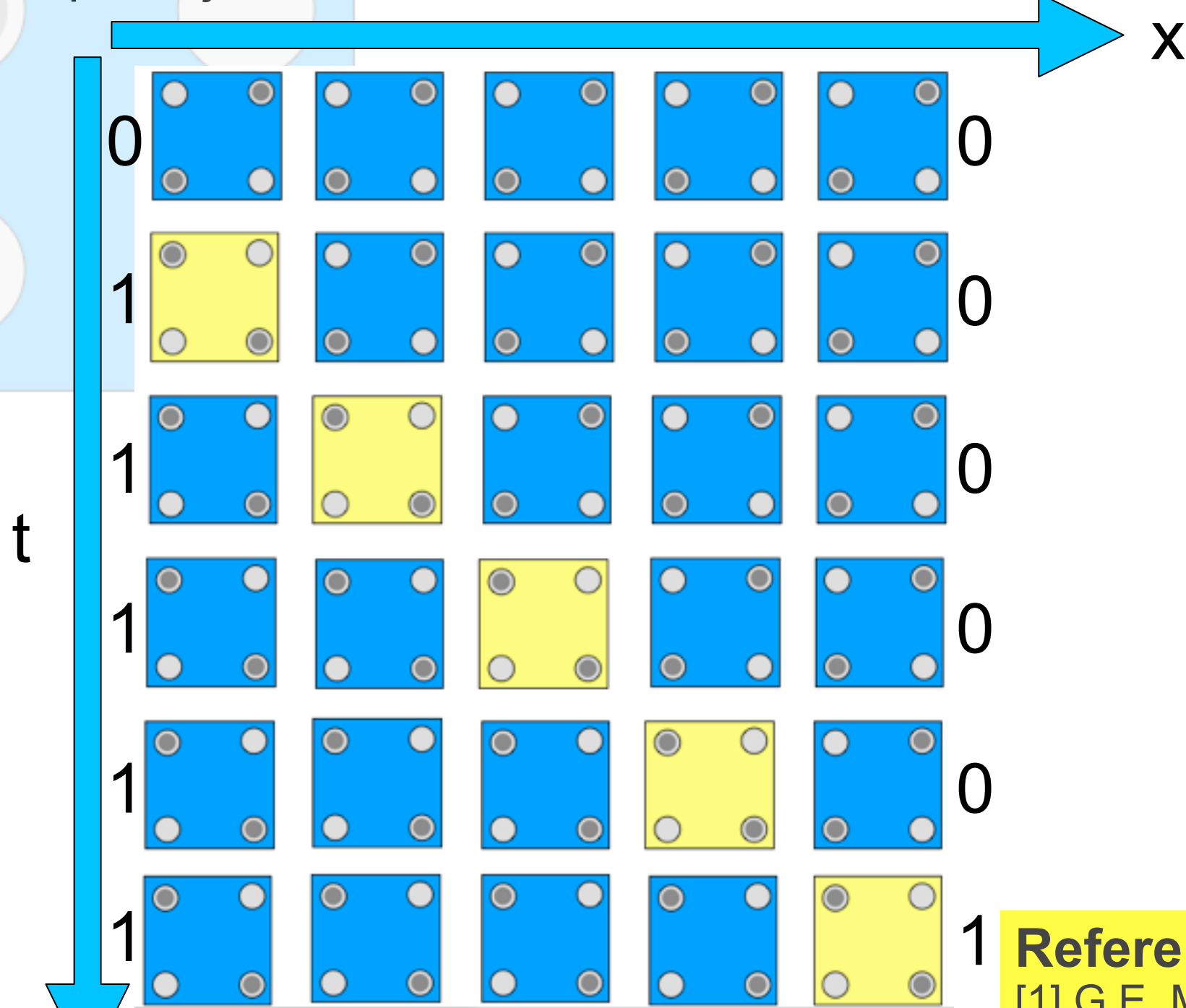
Rješenje:

Kvantni celularni automati (QCA) [2,3] nude daljnju minijaturizaciju osnovnog gradivnog elementa u obliku aktivnog sklopa koji se sastoji od **4 kvantne jame** i **dva elektrona** (Slika 5.).

Osnovno stanje takvog sustava dobije se rješavanjem Hamiltonijana (1) koji pokazuje da u osnovnom stanju postoje dvije moguće konfiguracije gustoće elektrona (slika 5a., 5b.) koje kodiraju binarnu informaciju. Informacija, odnosno stanje u QCA ćelijama, prenosi se kulonskom interakcijom i između ćelija nema transporta elektrona (električna struja).

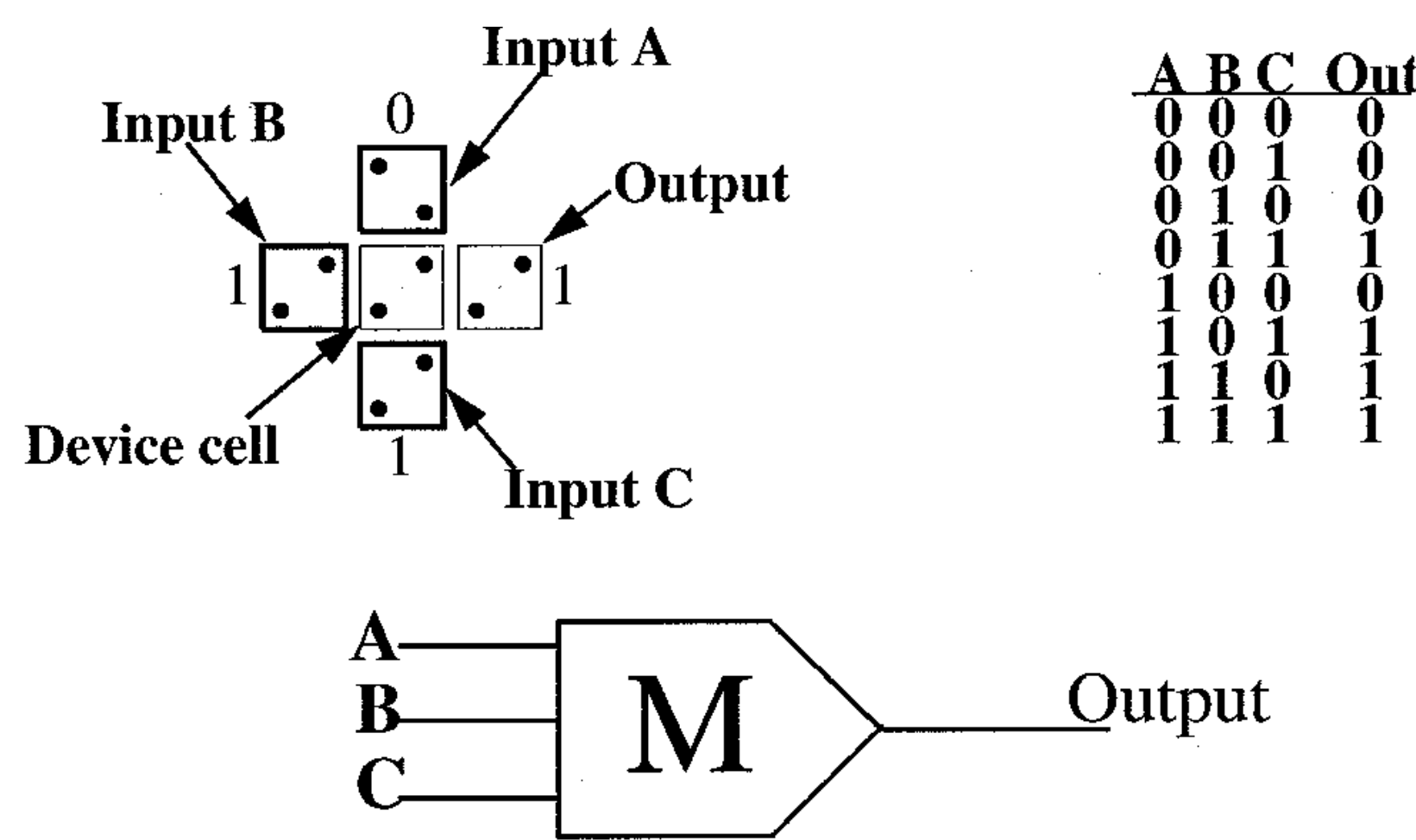
Na Slici 6. prikazan je protok informacija u QCA sustavu koji može poslužiti kao žica i iz koje se vidi tipičan slijed promjene stanja koji je sličan dominu ili u ovom slučaju nano-domino.

Na Slici 7. prikazan je QCA sustav koji izvršava osnovne logičke operacije



Slika 6. QCA žica. Nakon što se u prvoj ćeliji promjeni stanje sa 0 na 1 interakcijom dolazi do promjene stanja u ostalim ćelijama u nizu (kvantni domino) nakon 5 vremenskih koraka.

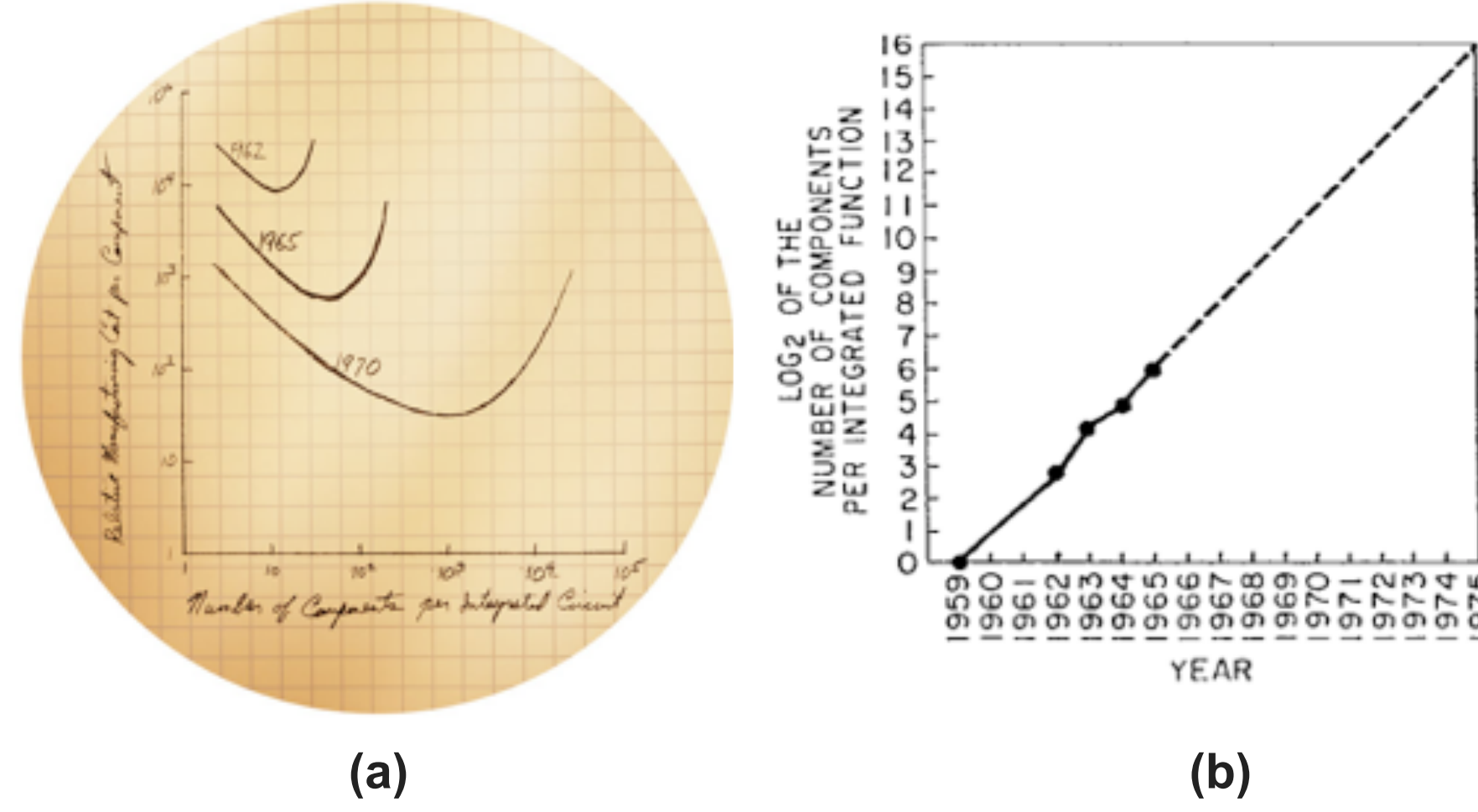
$$H_0^{cel} = \sum_{i,\sigma} (E_{0,i} + V_i) n_{i,\sigma} + \sum_{i,\sigma} t(a_{i,\sigma}^\dagger a_{0,\sigma} + a_{0,\sigma}^\dagger a_{i,\sigma}) + \sum_i E_{Q,i} n_{i,\uparrow} n_{i,\downarrow} + \sum_{i>j,\sigma,\sigma'} V_Q \frac{n_{i,\sigma} n_{j,\sigma'}}{|\vec{R}_i - \vec{R}_j|}$$
$$P = \frac{(\rho_2 + \rho_4) - (\rho_1 + \rho_3)}{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5} \quad (2)$$
$$\rho_i = \langle \Psi_0 | n_i | \Psi_0 \rangle \quad (3)$$



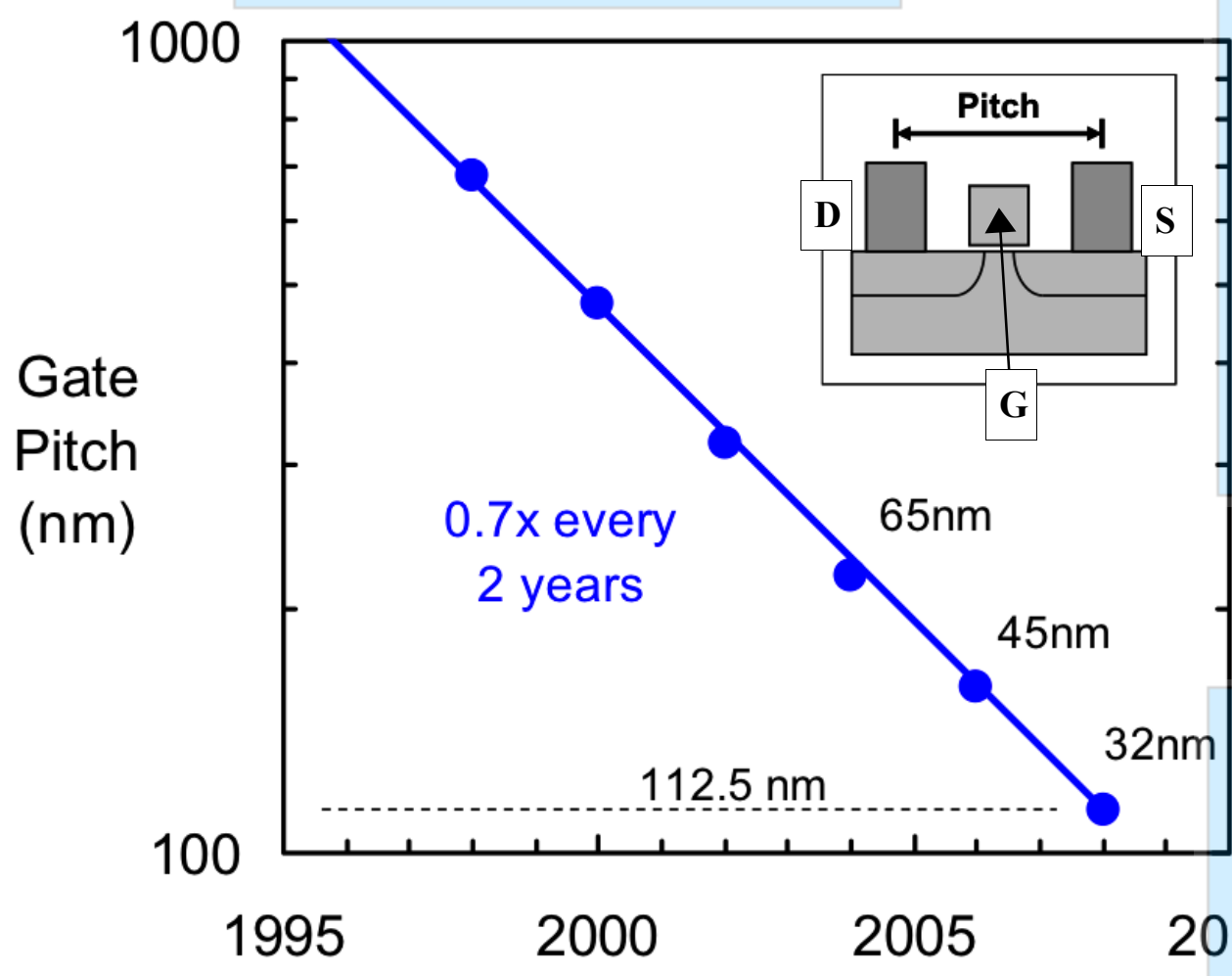
Slika 7. Za A = 0 dobije se AND sklop, za A = 1 dobije se OR sklop.

Reference:

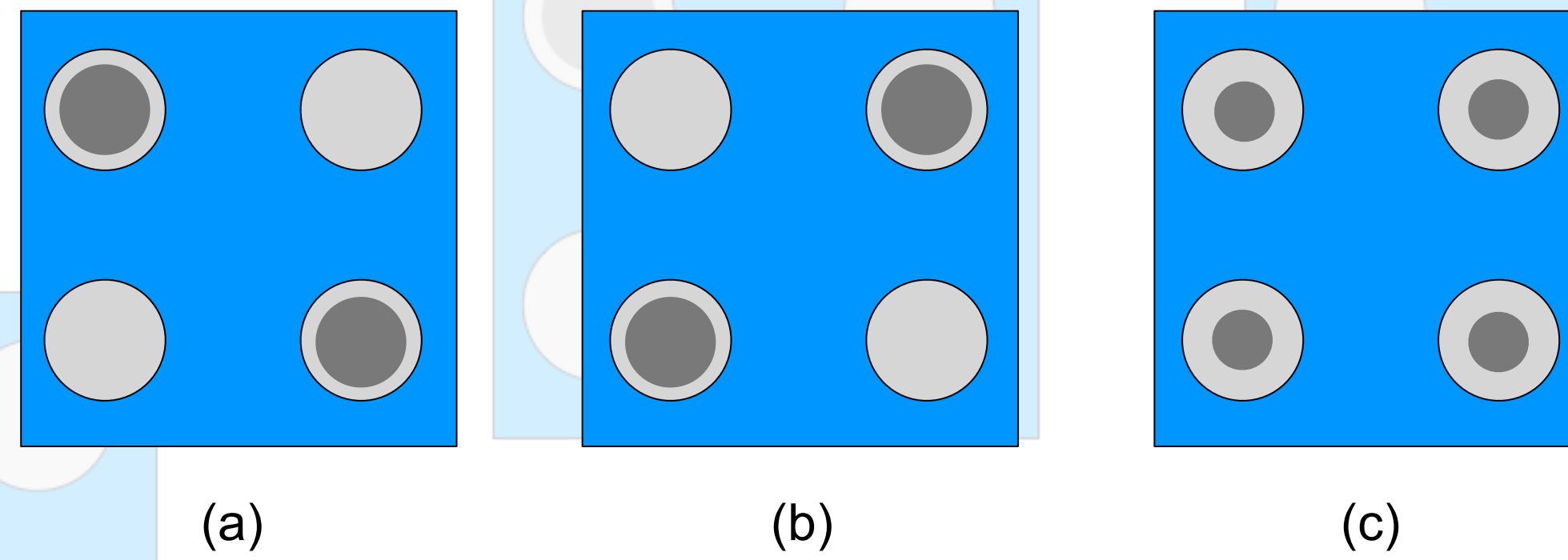
- [1] G.E. Moore, Cramping more components onto integrates circuits, Electronics, Vol. 28, 1965.
- [2] C.S. Lent et al., "Quantum cellular automata", Nanotechnology, Vol 4, p.49-54, 1993.
- [3] W. Wang, K. Walus and G.A. Jullien, "Quantum-Dot Cellular Automata Adders", Nanotechnology, Vol. 2., p.461-464, 2003.
- [4] M.T. Niemer, Designing Digital Systems in QCA, Master Thesis, University of Notre Dame, Indiana, 2004.



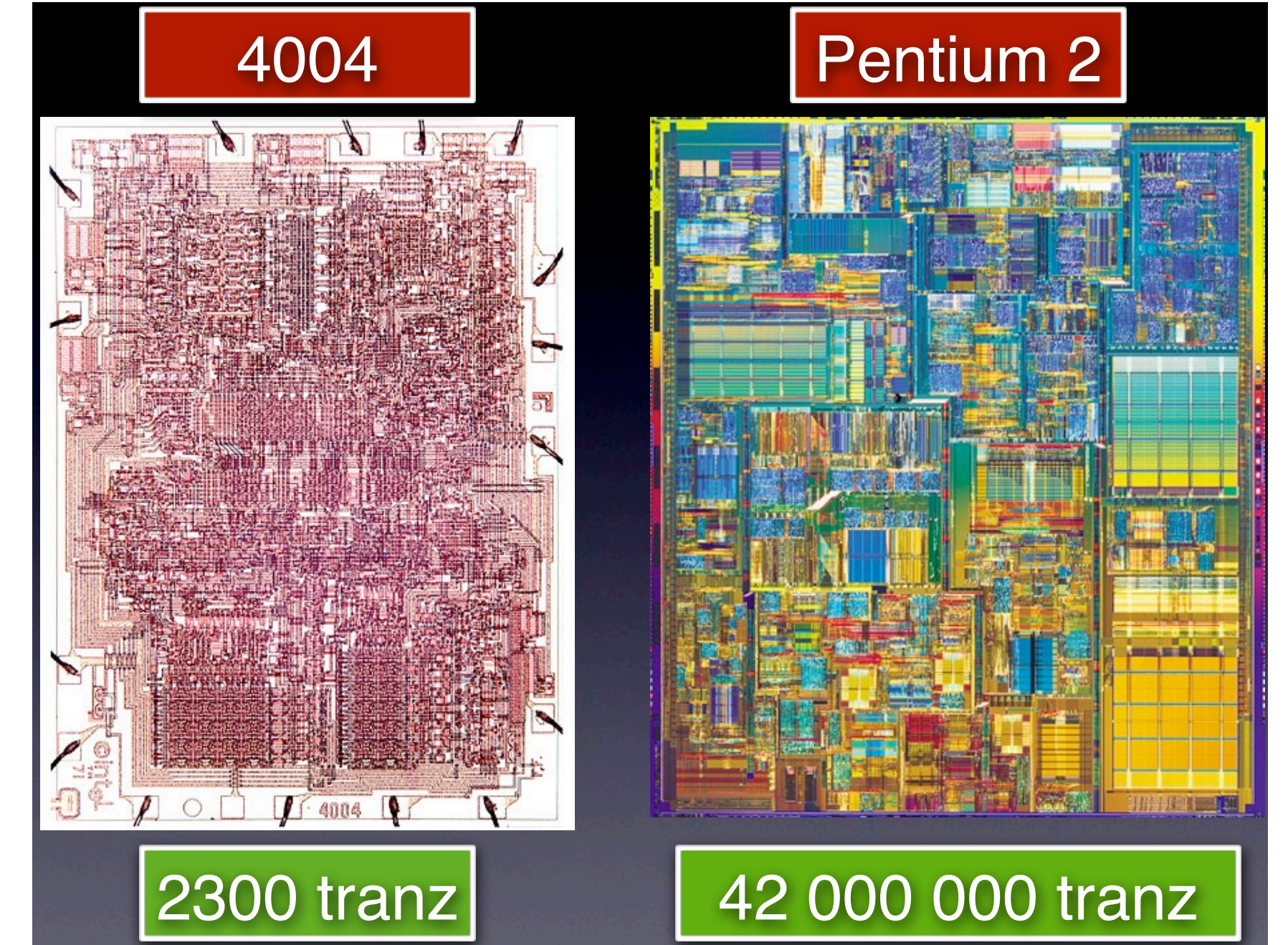
Slika 1. a) Originalni Mooreov crtež iz 1965 u kojem uočava da za svaku tehnologiju proizvodnje integriranih krugova postoji ekonomski minimum troškova proizvodnje pri određenom broju aktivnih elemenata (tranzistora) na površini čipa. b) Mooreov graf iz [1] u kojem su pokazani realni podaci (puna linija) i predviđanje (crtkana linija) za sljedećih deset godina počevši od 1965 g. (nastaje Mooreov zakon)



Slika 4. Smanjenje veličine tranzistora u vremenu.



Slika 5. a) Osnovno stanje jedne QCA ćelije i elektronski oblak u konfiguraciji P =1 (**bit 1**) b) Osnovno stanje jedne QCA ćelije i elektronski oblak u konfiguraciji P =-1 (**bit 0**) c) Elektronska gustoća dvaju elektrona raspodijeljena na 4 kvantne jame, polarizacija nije prisutna.

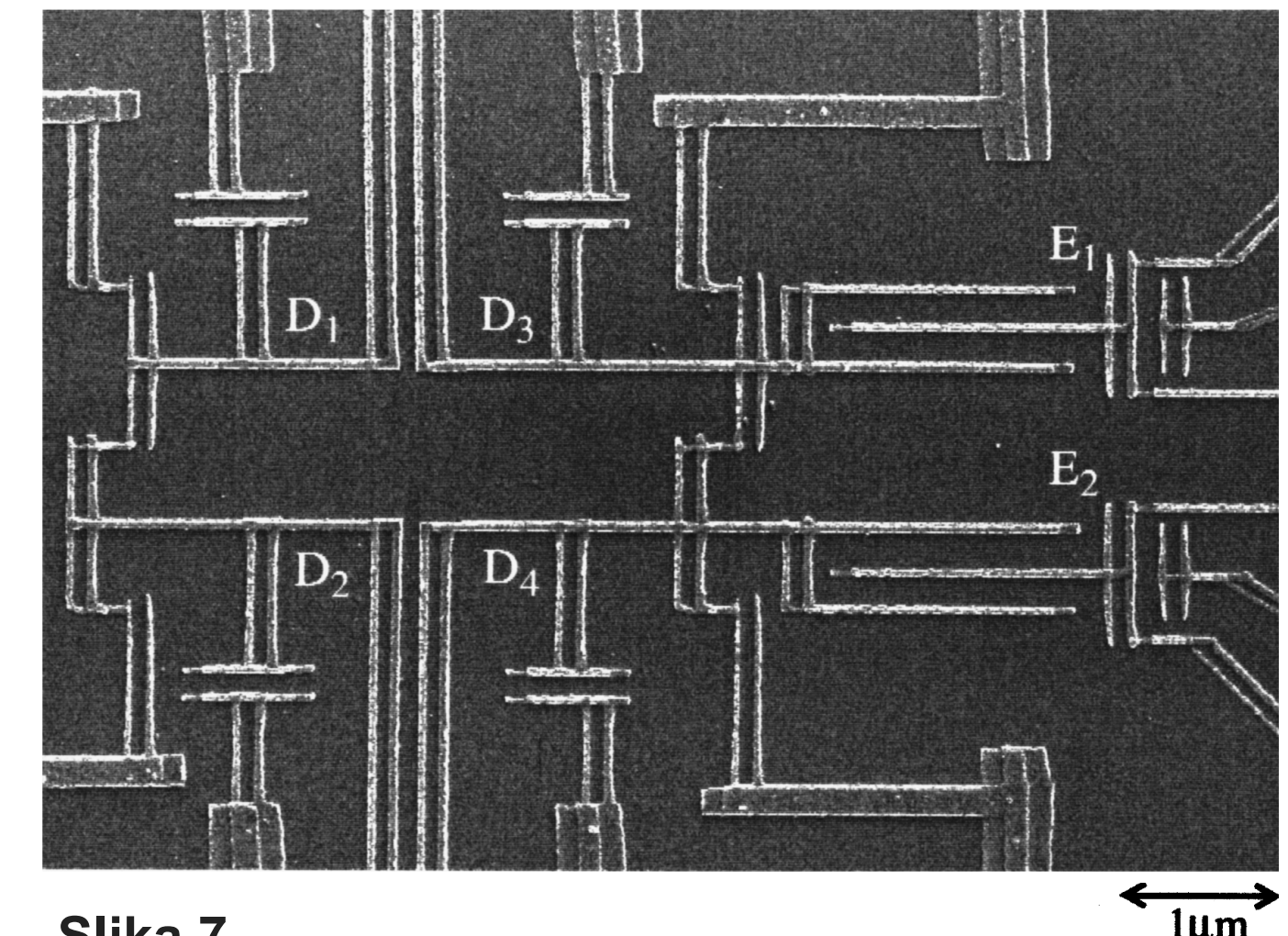


Slika 2. Usporedba površina dvaju procesora jednakih površina. Procesor 4004 je prvi Intelov komercijalni proizvod iz 1971. i ima 2300 tranzistora. Pentium 2 iz 2000 g. ima oko 42 000 000 tranzistora.

Problem:

Problem sa Mooreovim zakonom nastaje kada minijaturizacija osnovnog gradivnog elementa svakog čipa (tranzistor koji služi kao električna sklopka u binarnoj logici (Slika 3.)) dosegne fizičke dimenzije u kojima kvantni i termodinamički efekti postaju značajni i u kojima se tranzistor više ne ponaša kao *dobra* električna sklopka.

Fizikalna granica u kojima tranzistor prestaje biti *dobra* električna sklopka **fundamentalna** je i ona zaustavlja Mooreov zakon i napredak na koji smo se navikli vidjeti iz mikroprocesorske industrije (Slika 4.).



Slika 7. Eksperimentalna realizacija jedne QCA ćelije.

Realizacija QCA sklopa (zbrajalo 1 bita)

